

doi:10.11835/j.issn.1000.582X.2024.10.005

# 北山 168 窟顶板加固工程及施工过程跟踪监测分析

刘珂源<sup>1a,1b</sup>, 蒋思维<sup>2</sup>, 冯太彬<sup>2</sup>, 陈卉丽<sup>2</sup>, 文加松<sup>3</sup>, 陶志刚<sup>1a,1b</sup>

(1. 中国矿业大学(北京) a. 隧道工程灾变防控与智能建养全国重点实验室; b. 力学与土木工程学院, 北京 100083;  
2. 大足石刻研究院, 重庆 402360; 3. 北京国电水利电力工程有限公司, 北京 100024)

**摘要:**大足石刻北山 168 窟在 1 000 多年的卸荷作用下, 洞窟内顶部裂隙纵横交错, 存在着严重的结构稳定性问题。加固工程实施前洞窟顶板使用钢板、钢管等材料临时支撑以维护文物安全。但裂隙仍有延伸发展的趋势, 且临时支撑钢板未做好防护措施, 表面锈蚀严重, 168 窟仍时刻面临失稳坍塌的危险, 急需进行抢险加固治理保护。由于该工程属于文保类项目, 要求在施工过程中不能够对本体造成较大扰动, 所以需要对其整个施工过程进行跟踪监测。基于此, 本文首先利用数值模拟的手段对在现有钢板支护下石窟的变形机理进行分析, 根据其分析结果对监测点位进行布设, 并根据监测数据对整个施工过程石窟的稳定性进行监测, 进行工程治理评价, 该监测结果可为类似大型平顶石窟破碎顶板的监测及保护工程提供参考。

**关键词:**平顶石窟; 监测; 数值模拟; 加固工程

**中图分类号:** TU87

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-582X(2024)10-061-25

## Beishan Cave 168 roof reinforcement project and construction process tracking monitoring analysis

LIU Keyuan<sup>1a,1b</sup>, JIANG Siwei<sup>2</sup>, FENG Taibin<sup>2</sup>, CHEN Huili<sup>2</sup>, WEN Jiasong<sup>3</sup>, TAO Zhigang<sup>1a,1b</sup>

(1a. State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering; 1b. School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, P. R. China; 2. Academy of Dazu Rock Carvings, Chongqing 402360, P. R. China; 3. Beijing Guo Dian Water Resources & Electric Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100024, P. R. China)

**Abstract:** After more than 1 000 years of unloading effects, the roof of Beishan Cave 168 at Dazu Rock Carvings is riddled with intersecting cracks, posing significant structural stability problems. At present, the cave roof is temporarily supported by materials like steel plates and pipes, but cracks continue to spread, and the steel plates are severely corroded, leaving the cave at risk of instability and collapse. Emergency reinforcement and protection are urgently needed. Due to the cultural importance of the site, the reinforcement process must minimize disturbance, necessitating continuous monitoring throughout construction. This paper uses numerical simulation to analyze the deformation mechanism under existing support conditions, guiding the placement of monitoring

收稿日期: 2023-12-22

基金项目: 重庆市科研机构绩效激励引导专项项目(cstc2021jxj100005)。

Supported by Chongqing Special Program for Performance Incentive and Guidance of Scientific Research Institutions(cstc2021jxj100005).

作者简介: 刘珂源(1997—), 男, 博士研究生, 主要从事岩土工程方向的研究, (E-mail)lky0313@163.com。

通信作者: 陶志刚, 男, 教授, 博士生导师, (E-mail) taozhigang@cumtb.edu.cn。

points. Monitoring data from the entire construction process are analyzed to evaluate the engineering treatment. The results provide valuable insights for monitoring and protecting similar structured grotto roofs.

**Keywords:** flat-top grottoes; monitoring; numerical simulation; consolidation project

大足石刻作为中国石窟代表之一,位于重庆市大足区境内,现存大量的具有较高历史、艺术、科学价值的摩崖造像及石窟寺文物,是我国唐宋时期宗教文化的历史缩影,对当代学者研究唐宋历史有着很重要的指导意义,而北山石刻作为大足区域内石窟的典型代表,具有重要的历史意义。168窟内石窟顶板在多年的风化作用<sup>[1-3]</sup>和自重应力的影响之下,石窟壁和其顶板位置也出现了大量的裂缝现象。2004年,当地文物管理部门采用钢板、钢管进行临时支护,但支护效果并不显著,裂缝仍在继续发展,并且钢板表面出现了严重的锈蚀现象。168窟作为古代珍贵的艺术品,具有极高的鉴赏价值,需要保证其艺术价值的观赏性,这就需要采取更为科学合理的措施对顶板进行加固,而且对施工过程保证文物安全也要求极高,因此,需要对整个施工过程进行跟踪监测。目前,对石窟进行现场监测也日益成为一种分析石窟稳定性的有效手段,通过监测曲线和现场情况对监测设置阈值,通过阈值来判断人为原因和环境对石窟所造成的影响,也可为后期分析工作提供数据支撑,众多学者对石窟监测方面进行了较多研究。2008年,傅燕与田世艳<sup>[4]</sup>针对龙游石窟抽水前后所发生环境的变化,利用电感测缝仪和钢尺对岩柱进行监测,为解决窟内破坏以及采用有效支护手段提供参考依据。2014年姜云辉等<sup>[5]</sup>对云冈石窟岩石变形、倾斜度、稳定性进行监测,并利用数学方法对数据进行处理,加强了文物保护与其他学科相融合。2018年,Zheng等<sup>[6]</sup>对龙门石窟所有可能造成破坏的成灾因子进行全方位的监测,并利用Excel、Kgraph、DPS对数据进行处理,探究出石窟裂缝与环境影响因素的相关性,并基于结果提出相应支护措施。2020年,TAO等<sup>[7]</sup>利用无接触、高精度的变形监测对圆觉洞顶板进行监测,并对监测结果进行分析,得出保护圆觉洞应从相应地表岩体的风化加速机理研究入手,减少环境破坏因素对洞窟围岩弱化的影响。2021年,张博等<sup>[8]</sup>为了探明北石窟开放程度对窟内环境的影响,利用温度湿度监测设备对不同开放程度下监测数据的日较差年平均值进行对比分析,为石窟保护管理方面提供了建议,也为后续分析石窟的稳定性做出了数据支撑。2021年,王龙珍<sup>[9]</sup>创建广域网大数据平台,将石窟保护工作中产生的数据上传至互联网云平台,保护了石窟监测当中来之不易的数据,确保了石窟预防保护工作的顺利进行。2021年,唐韵玮等<sup>[10]</sup>利用遥感技术为不可移动文物监测提供了技术支撑,从宏观上在地表位移和雨量监测进行了细致的测量,揭示了文物时间和空间的变化规律。2021年,刘逸堃等<sup>[11]</sup>通过对龙门石窟所处环境进行监测,采用风向、红外、CO<sub>2</sub>浓度监测设备、雨量监测设备进行数据采集,利用时间序列分析对温度频率、降雨渗水、数据进行处理分析,探究出最利于石窟保存的环境状态。

通过上述研究发现,多数监测措施仅针对于石窟周围的环境进行监测,而很少有针对于石窟本体的监测,特别是针对石窟加固工程进行施工过程跟踪监测则少之又少,开展石窟寺加固过程跟踪监测是保证安全性施工的重要条件之一。基于此,本文首先利用数值模拟的手段对现有钢板支护下石窟的变形机理进行分析,根据其分析结果对监测点位进行布设,并根据监测数据对整个施工过程石窟的稳定性进行监测,进行工程治理评价,该监测结果可为类似大型平顶石窟破碎顶板的监测及保护工程提供参考。

## 1 工程地质概况

### 1.1 地理位置

大足石刻是中国著名的文化遗产旅游胜地,有“石刻之乡”的美誉,1999年12月1日被联合国教科文组织列入《世界遗产名录》。位于大足区城北1 km的北山佛湾第168号五百罗汉窟为北山石刻的重要代表,在1 000多年的风化作用和自重应力影响下,顶板存在大量裂缝,随时面临失稳坍塌的危险,168窟内全貌图如图1所示。



图1 168窟内全貌

Fig. 1 Overall view of Cave 168

### 1.2 石窟边坡岩性

根据现场工程地质调绘及钻探揭露情况,研究区主要地层岩性为第四系残坡积物和遂宁组,如图 2 所示。

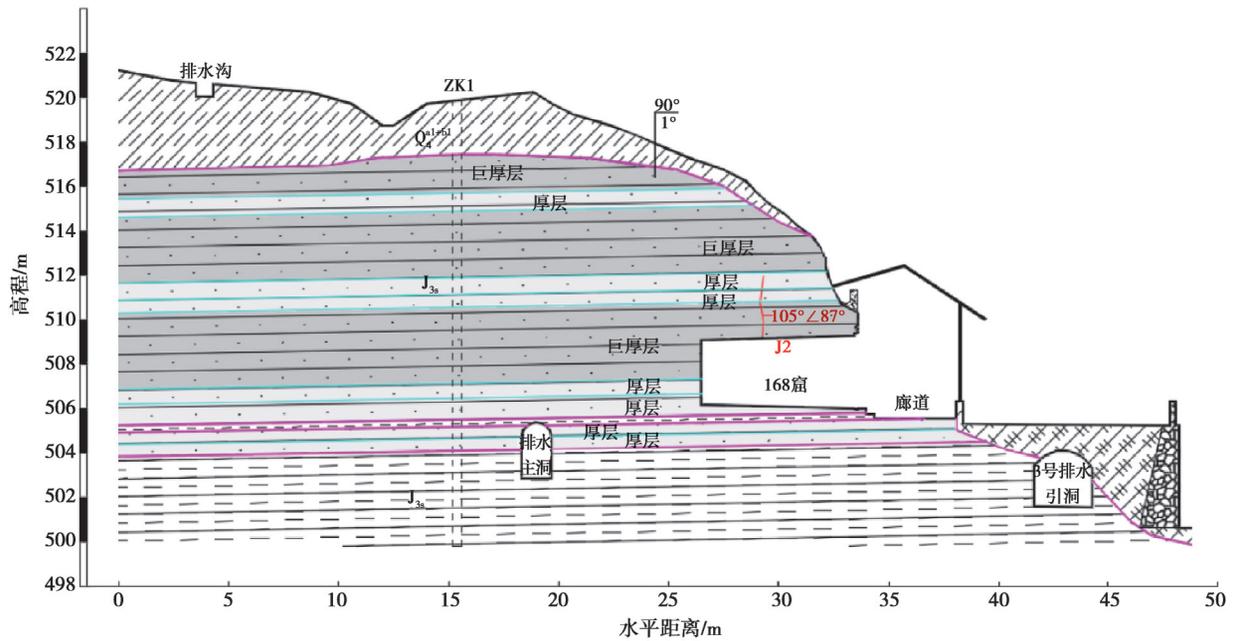


图 2 168 窟地层结构调查剖面图

Fig. 2 Stratigraphic structure survey profile of Cave 168

1)第 4 系残坡积物(Q4el+dl):主要由残坡积粉质黏土夹杂碎石、砂颗粒组成,含有大量植物根系和枯叶。其中粉质黏土呈红褐色,可塑~硬塑状为主,中~低压缩性。该层主要分布于佛湾陡崖顶部和斜坡之上,堆积厚度以 0.5 ~ 5 m 为主。

2)遂宁组(J3s):在北山石窟区仅出露上段。主要为 1 套紫灰、紫红色厚层块状细粒长石石英砂岩和紫红色泥岩、粉砂质泥岩组成。

第 1 层泥岩:紫红色粉砂质泥岩夹多层薄层粉细砂岩,厚 13 m。

第 2 层砂岩:厚层块状泥质钙质胶结长石石英砂岩,厚 7 ~ 15 m,地形上构成直立陡崖,佛湾石刻造像均分布在于此层之中。

第 3 层泥岩:紫红色泥岩夹薄层粉砂岩,厚 25.79 m,地形上构成缓坡。

第 4 层砂岩:厚层块状砂岩夹薄层泥岩,厚约 10 m,地形上构成陡壁。

第 5 层泥岩:紫红色泥岩、泥质粉砂岩,厚 9.75 m,地形上构成缓坡。

### 1.3 168 窟外崖优势裂缝地质分析

大足石刻区内主要发育有各类裂缝,其中构造裂缝、层面裂缝、卸荷裂缝较发育,构造裂缝与层面裂缝交切,构成了北山石刻区的裂缝网络系统。168 窟高 3.3 m,宽 3.14 m,进深 7.1 m,南侧陡崖因人工采石开挖形成 1 个向东凹进的不规则空腔,空腔与 168 窟之间侧壁厚度不均匀,最薄处 0.84 m,石窟周边裂缝 NE、NW 向较为发育,大部分裂缝均为陡倾,以 65°以上角为主,层面倾角较小,多数在 10°以内,168 窟周边裂缝见图 3 所示,内部顶板对洞窟窟顶稳定性影响较大的裂缝主要有 5 条,其中近东西向的 J1 裂缝与近南北向的 J2 裂缝构成了顶板破坏的主要裂缝,如图 4 所示。

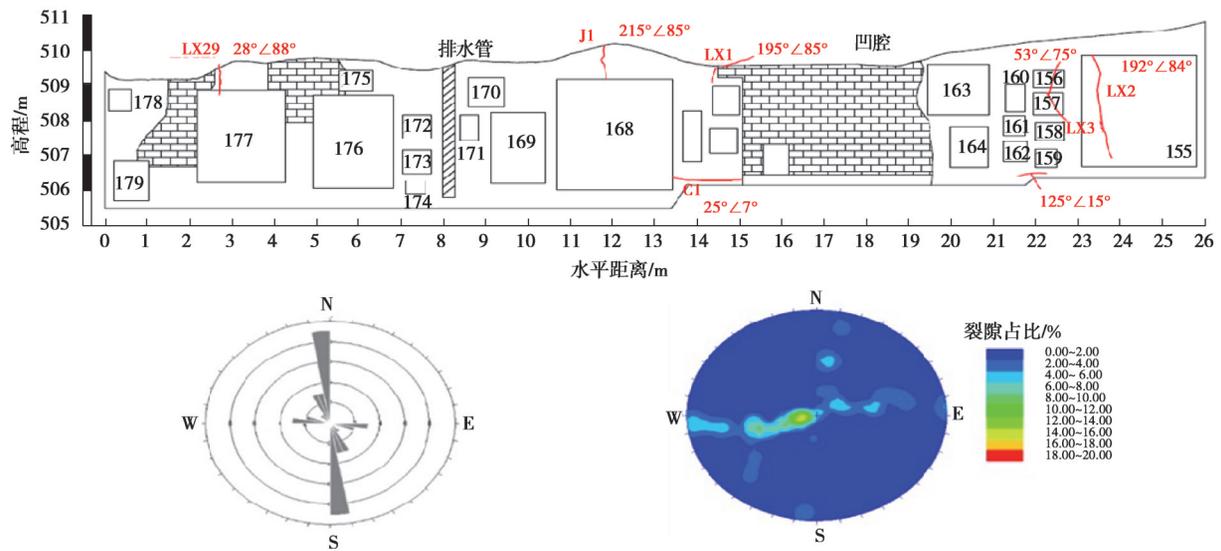


图 3 168 窟外崖壁裂缝分布图

Fig. 3 Distribution map of cracks on the outer cliff wall of Cave 168

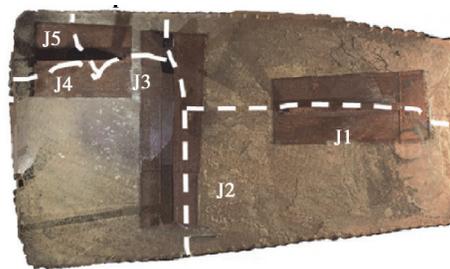


图 4 168 窟顶板裂缝分布图

Fig. 4 Distribution map of cracks on the roof of Cave 168

1.4 水文地质条件

大足区一年当中雨水分配较不均匀,在春冬季总降雨占比 32%,夏秋季降雨较为集中,在 5~9 月期间为雨季集中的季节,期间总的雨量为 785 mm,超过了每年的 78% 降雨量,平均每年有 10 d 降雨量超过 30 mm,有 4 d 是暴雨天气,其雨量超过了 47 mm,每年平均降雨天气有 148 d 左右,年降雨量保持在 665~1 010 mm 之间。每年 1 月和 7 月份分别是温度最低与最高月份,温差达 18 °C,如图 5 所示。

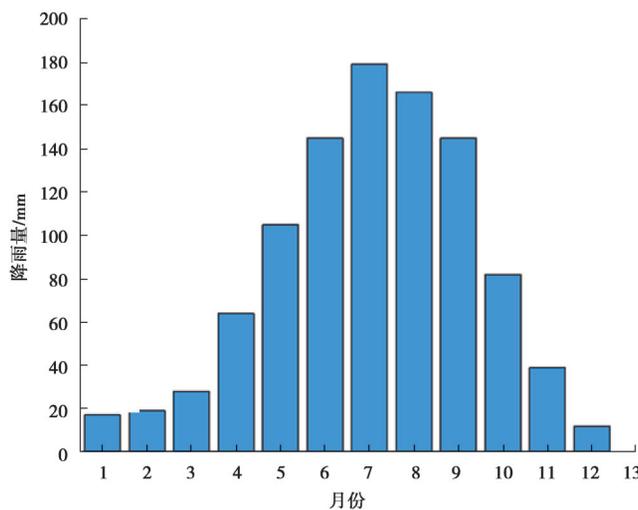


图 5 大足石刻区多年各月平均降水量

Fig. 5 Average monthly precipitation in Dazhu Rock Carvings area for years

根据地层岩性、地下水赋存、水理性质和富水性,可将保护区范围内地下水分为两类:第 4 系松散岩层孔隙水和基岩裂隙水。

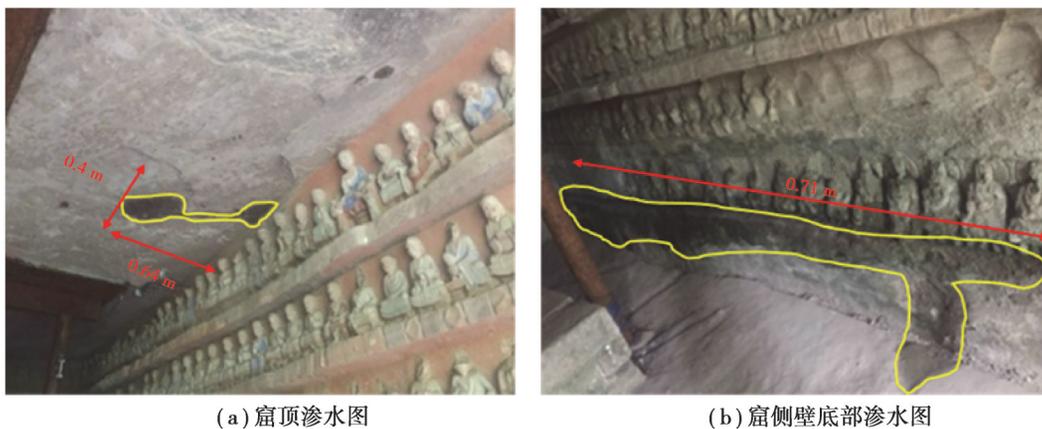
第 4 系松散岩层孔隙水:从场地地层构成情况来看,孔隙水主要赋存于石窟区底部标高 506 m 以下的缓坡及北佛湾顶部的凹地内的含碎石砂质黏土和粉质黏土中。

基岩裂隙水:主要储存在砂岩内部的连通裂缝网络之中,裂缝中的水保持一定的不均一性质且具有时空分布特征,并与上层的孔隙水有一定的水力联系。

## 1.5 存在工程地质问题

### 1.5.1 渗水病害

168 窟渗水部位主要是南侧顶板裂缝处和南侧砂岩与泥岩交界处,补给来源均为大气降水,一部分水通过南侧凹腔与 168 窟贯通的裂缝入渗至 168 窟内,一部分水通过砂岩与泥岩交界面入渗至 168 窟内。顶部渗水影响范围主要是顶板裂缝发育处,长度约 0.64 m,影响宽度约 0.1~0.4 m。底部渗水影响范围主要是南侧第一层造像和第二层造像的底部,影响高度约为 0.85 m,影响进深约为 7.1 m,如图 6 所示。



(a) 窟顶渗水图

(b) 窟侧壁底部渗水图

图 6 168 窟渗水病害

Fig. 6 Seepage diseases in Cave 168

### 1.5.2 文物病害

由于裂缝以及降雨渗水等不利于石窟稳定因素的存在,窟内佛像主要病害类型为大范围发育的表面粉化剥落、表面鳞片状起翘与剥落、彩绘颜料脱落、大气及粉尘污染等、微生物病害、表层片状剥落等病害。

表面鳞片状起翘、剥落:周期性的温度变化和风化作用形成的,造成石刻发生鳞片状、片状的剥落病害,主要是由于窟内渗水导致环境潮湿,这种病害非常严重,导致石窟墙壁出现严重的病害,如图 7 所示。



图 7 窟内表面风化病害现状

Fig. 7 Surface weathering diseases in Cave 168

大气及粉尘污染:石窟内的石刻表面沉积有粉尘、污染物和风化产物的沉积而导致的石质文物表面污染和变色现象。大部分罗汉石刻的身上都有粉尘及风化产物的污染,非常明显,严重影响了石质文物的保存,如图 8 所示。



图8 大气及粉尘病害现状

Fig. 8 Air and dust diseases in Cave 168

微生物病害:由于渗水等原因使石窟潮湿,苔藓、地衣与藻类群、霉菌等均微生物菌群在石质文物表面及其裂隙中繁衍生长,掩盖石刻精美纹饰,导致石质文物表面变色及表层风化,不利于石窟的保存,如图9所示。



图9 窟内微生物病害现状

Fig. 9 Water seepage diseases in Cave 168

## 2 现场施工主要工序

该保护工程施工项目主要是保护研究与抢险加固工程相结合,对北山168窟目前存在的主要结构病害进行抢险加固,消除自然因素条件对洞窟构成的安全威胁,为洞窟的长期保护和合理利用创造有利的环境条件。主要采用窟内裂隙、空鼓注浆、石窟南侧壁凹腔加固、悬吊锚杆施工等科学合理的工程措施对168窟进行加固,本章将对主要的施工措施进行阐述。

### 2.1 注浆加固阶段

168窟窟内存在裂缝,裂缝的存在会导致石窟在雨季产生渗水现象使得窟内环境潮湿,进而使得石窟造像及窟壁裂缝、空鼓病害加剧,加之施工过程中可能对造像及石窟稳定性造成扰动,不利于文物保护和加固工程实施,故需要对石窟内造像、窟壁发育的空鼓和裂隙病害进行封闭注浆处理,现场施工如图10所示,根据裂隙出露位置、产状的不同,采用的注浆材料有偏高岭土以及环氧树脂。



(a) 造像本体裂隙填充



(b) 造像本体裂隙填充

图 10 造像本体空鼓、裂隙填充

Fig. 10 Filling with cracks in the main body of the statues

### 2.2 凹腔加固阶段

因人工采石开挖使 168 窟南侧陡崖向东凹进形成一个空腔,空腔形状不规则,腔体最大宽度 5.75 m,最大进深 5.08 m。空腔与 168 窟之间侧壁厚度不均匀,最薄处 0.84 m,因此需要对石窟南侧的凹腔崖壁部分进行加固。主要加固措施分为对凹腔北壁撑砌加固、凹腔北壁锚杆加固。

凹腔北壁撑砌加固工程:将撑砌体随凹腔形状进行浇筑,保证外立面竖直、顶面窄、底面宽。撑砌上部、排水沟下方设置一道小横梁,横梁与支撑墙一体浇筑,交接处钢筋加密做暗梁,撑砌体、支撑墙设置暗梁以及预埋件,通过工字钢支撑连接,加固示意图如图 11 所示,现场施工如图 12 所示。

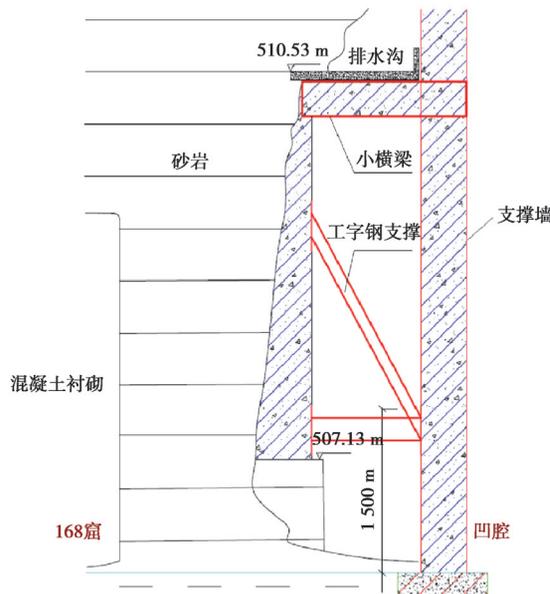


图 11 凹腔北壁撑砌加固工程

Fig. 11 Reinforcement project for the lining of the northern wall of the concave cavity



(a) 北壁补强后钢筋绑扎

(b) 撑砌模板安装



(c)小横梁、支撑墙钢筋绑扎

图12 凹腔北壁撑砌加固工程

Fig. 12 Construction sites for the reinforcement of the lining of the northern wall of the concave cavity

凹腔北壁锚杆加固:为保证与支撑墙之间的稳定性,主要采取岩体锚杆、扁钢栓锚的方式对凹腔东壁及其裂隙进行加固处理,图13为加固位置示意图,图14为现场锚杆拉拔试验,根据《岩土锚杆(索)技术规程》规定,最大试验荷载不超过杆体标准值的0.8倍,锚杆极限承载力取破坏荷载的前一级荷载,在最大试验荷载下未达到破坏标准时,锚杆极限承载力取最大荷载,在此基础上进行锚杆现场拉拔试验。

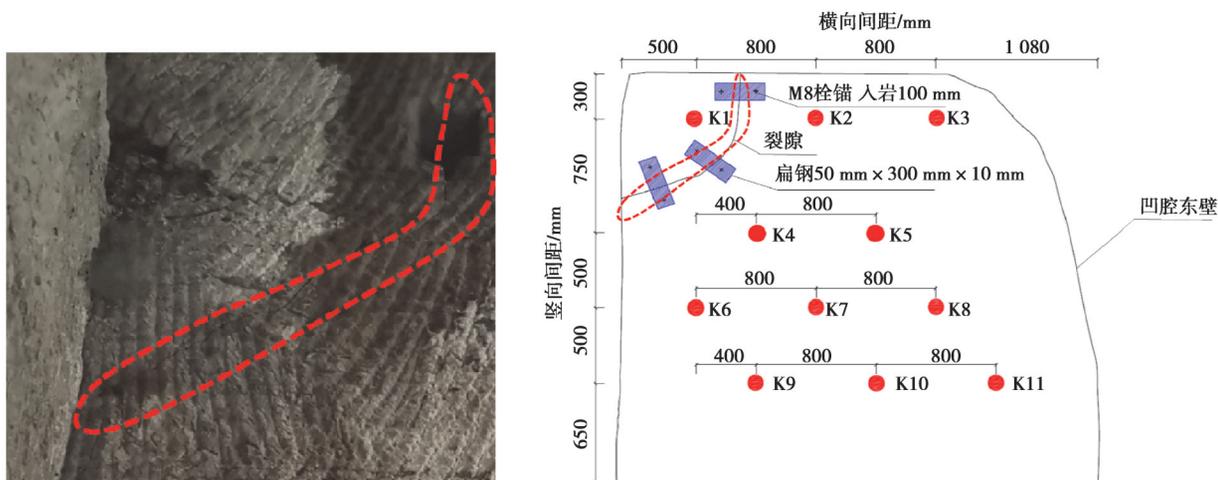


图13 凹腔北壁锚杆加固

Fig. 13 Reinforcement of anchor rods on the north wall of the concave cavity



图14 锚杆拉拔试验

Fig. 14 Anchor rod pull-out test

### 2.3 悬吊锚杆加固施工

#### 2.3.1 锚杆施工

钻孔施工顺序: K1→K3→K2→K4→K6→K5→K7→K9→K8。每个孔每钻进 0.5 m 需进行测斜、除尘、洗孔等工序,图 15 为钻孔施工示意图。确定已完作业无误后方可继续钻进。完孔后,需做孔内电视。之后对钻孔位置锚杆进行灌浆处理,并在窟顶板处封锚开槽,每排 3 孔共一槽,封锚钢板定制条形钢板,做整体封锚,悬吊锚杆采用预应力砂浆锚杆,锚杆杆体为 PSB1080 级精轧螺纹钢,直径 25 mm,长约 6.5 m,安装如图 16 所示。

在钻孔同时,利用千斤顶+钢管、液压支柱+压力盒,在窟内做好额外的临时支撑。做好实时监测数据的提取、分析。若钻孔前后顶板位移监测、压力盒数值变化无异常,方可继续施工,图 17 为窟内液压支柱压力盒安设图。

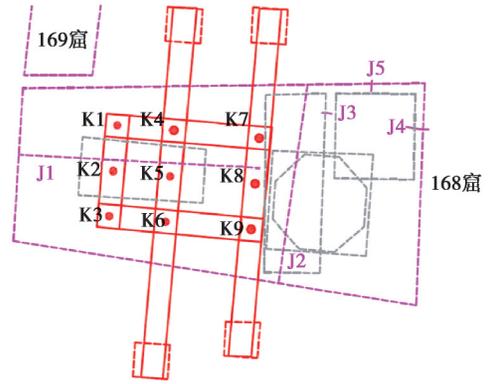


图 15 钻孔施工顺序图

Fig. 15 Drilling construction sequences



(a) 锚杆灌浆



(b) 锚杆封锚

图 16 悬吊锚杆安装

Fig. 16 Suspension bolt installation



图 17 窟内液压支柱压力盒安设

Fig. 17 Installation of hydraulic prop pressure box in the grottoes

#### 2.3.2 悬吊梁施工

悬吊梁工程布置了 3 道南北向、4 道东西向共计 7 道钢筋混凝土梁。以窟顶基岩为基础浇筑 4 个支墩,连同凹腔处支撑墙作为整个悬吊梁系统的支撑,混凝土等级为 C30。7 道梁采用整体浇筑的方式一次浇筑成型,施工示意图如图 18 所示,现场施工如图 19~20 所示。

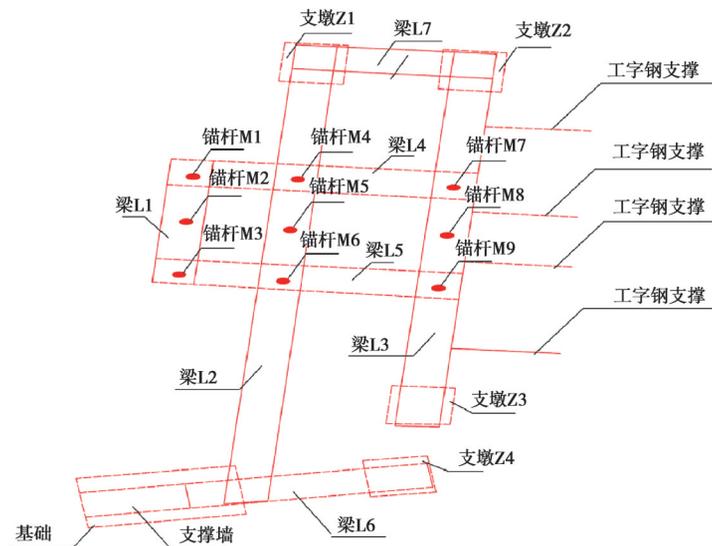


图 18 悬吊梁工程平面布置图

Fig. 18 Layout plan of suspension beam project



图19 悬吊梁钢筋绑扎及浇筑

Fig. 19 Binding and pouring of suspension beam reinforcement



图20 悬吊梁养护

Fig. 20 Maintenance of suspension beam

### 2.3.3 钢支撑拆除

拆除旧有钢管之前,先在旁边做千斤顶+钢管支撑,上到一定压力。拆除钢管后,静置一段时间,采集压力盒以及监测数据无异常后,对千斤顶+钢管进行试验性卸荷,直至对窟内钢板完全拆除,如图21所示。

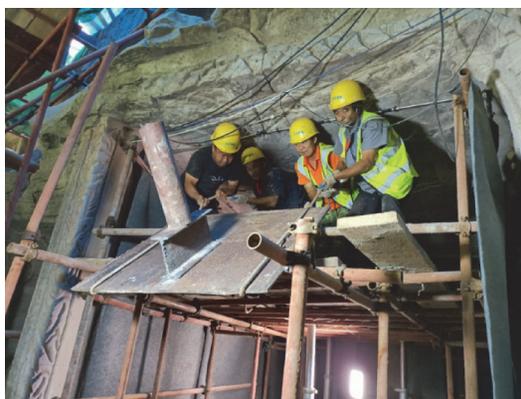


图21 原支撑钢板拆除

Fig. 21 Removal of the original support steel plate

### 2.3.4 石窟顶板加固

旧有支撑完全拆除后,在顶板内采取碳纤维板方式对石窟顶板进行加固,防止窟内顶部浅层发生剥落现象,并对碳纤维板进行做旧处理,碳纤维板宽200 mm,厚2 mm,一般间距0.5 m,板两端采用100 mm×5 mm钢板进行固定,可以增大岩层间抗剪强度,限制层间滑动破坏,如图22所示。

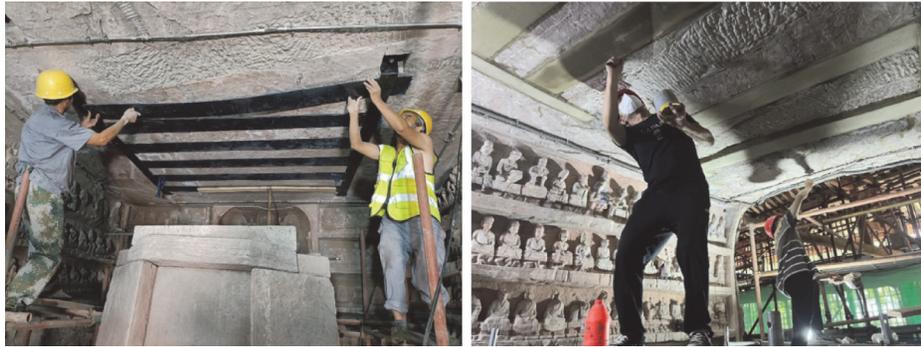


图 22 石窟顶板加固

Fig. 22 Reinforcement of cave roof

## 2.4 施工重难点

1) 悬吊系统钻孔: 由于施工部位位于 168 窟正上方, 本身顶板已经有裂隙, 在保证顺利钻孔的情况下还要尽可能减少设备震动和施工用水对文物的影响, 施工难度较大。解决办法: 选用高精定位仪器和娴熟的测量人员, 确保钻孔孔位的准确性, 过程中对孔的垂直度进行复核, 钻孔自上往下进行, 选用回旋式钻机, 减少震动; 施工前将已知表面裂隙进行封堵。

2) 裂隙灌浆: 裂隙灌浆分顶板上部裂隙灌浆和窟内侧壁裂隙灌浆, 灌浆点与石刻很近, 岩体内部裂隙分布情况不清, 灌浆期间壁面对侧壁石刻造成污染是灌浆作业的难点。解决办法: 灌浆前用水进行试灌, 若石刻表面有裂隙串通, 须提前封闭后才可进行灌浆, 采用“长时低压”灌浆工艺, 通过低压使灌浆料缓慢渗入裂隙内部, 避免压力过大或灌浆量过大导致灌浆料直接从石刻表面喷出。

3) 窟内文物保护: 窟内空间较小, 石刻分布密集、支顶结构和石刻很近, 窟内文物保护作业的难点。解决办法: 在支撑加固前做好窟内所有文物的保护, 制作与窟内结构尺寸对应钢管支架, 对内侧靠近文物区进行软质材料覆盖, 最大程度上保护石刻不受损伤。

## 3 石窟监测点位的选取

考虑到石窟内裂缝较多, 顶板情况比较复杂, 施工工序繁多、施工过程中可能对石窟造成扰动较多, 故需要对施工过程进行跟踪监测, 以便更好对顶板稳定性进行判断, 而对石窟顶板监测点的选取则是决定监测效果好坏最重要的一步。

### 3.1 168 窟数值模拟建立

本次模型的建立采取 Rhino6 进行建模, 首先根据北山 168 窟现场所确定的等高线图进行导入, 并利用软件里的“点物件”工具将线进行分段。之后利用“网格”工具转变为网格面, 并对网格面进行切割, 最终实现模型图由“线-曲面”的转变。建立好模型之后, 将模型分块导入 HyperMesh, 进行地层划分、开挖、网格划分等操作命令。最终将模型导入 FLAC3D 中进行数值计算。

本文通过对实体单元赋予材料参数来对钢板进行模拟, 并通过桩单元来对钢管进行模拟, 其受力情况采用设置桩底端承载来实现, 而桩与钢板相连接部位仅为结构单元与网格连接, 处于不受力状态, 通过接触面模拟裂缝, 利用地下水面模拟降雨, 模型的建立如图 23 所示。建模范围取 X 方向 29 m, Y 方向 29 m, Z 方向 14 m, 结合现场周围环境勘察地层厚度取值如表 1 所示, 结合岩土工程室内试验, 确定 168 窟地层参数如表 2 所示。

表 1 三维建模分层厚度

Table 1 Layer thickness of 3D modeling

类别	标高/m	厚度/m
粉质黏土层	517.5~519	1.5
中风化砂岩	506~517.5	11.5
中风化泥岩	506 以下	4.0

表2 地层参数  
Table 2 Formation parameters

类别	天然重度 /( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	变形模量 $E/\text{GPa}$	泊松比	内黏聚力 /MPa	摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
粉质黏土层	18.5	0.013	0.30	0.011	19.0
中风化砂岩	25.4	3.03	0.27	2.36	43.2
中风化泥岩	23.0	1.36	0.24	5.27	31.3

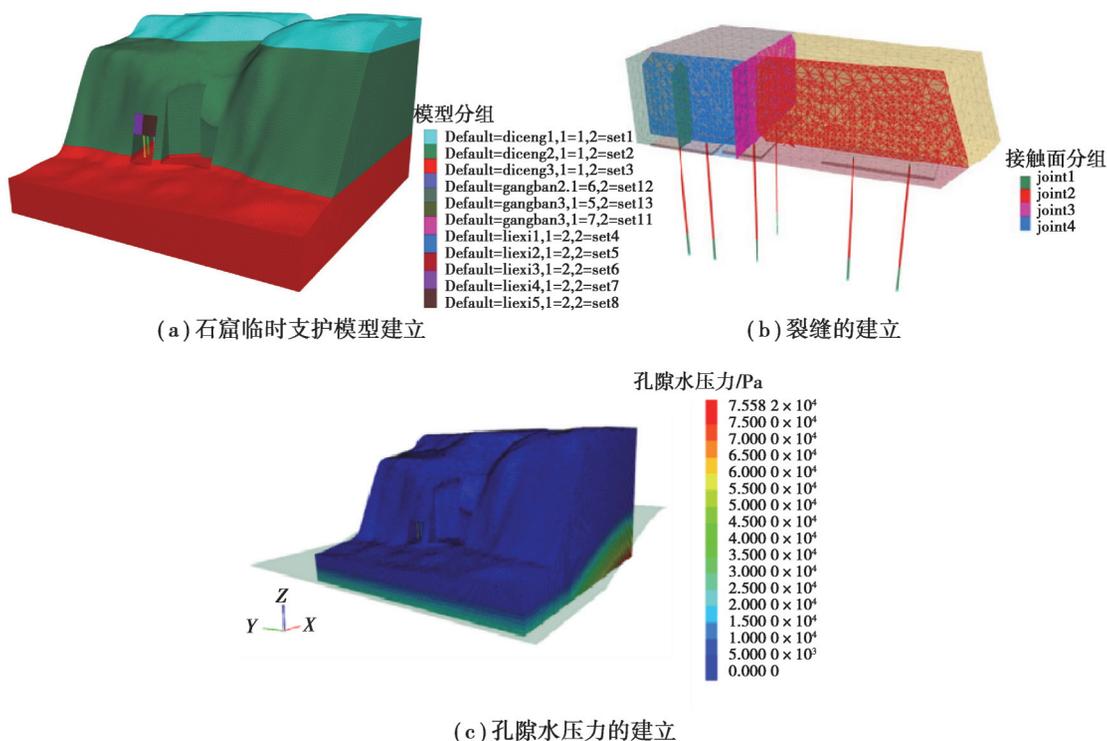


图23 现场模型的建立

Fig. 23 Establishment of on-site models

### 3.2 168窟整体位移图分析

图24为天然工况下石窟位移云图,由图可以看出,石窟周围附近总位移为0.8 mm, $X$ 向位移为-0.8 mm, $Y$ 向位移为-0.07 mm, $Z$ 向位移为-0.6 mm,其中石窟洞口顶板上方岩石总位移为1.2~1.6 mm, $X$ 向位移为-0.56~-0.63 mm,石窟北侧洞口上方岩石 $Y$ 向位移-0.2 mm,南侧为0.14 mm, $Z$ 向位移为1~1.5 mm,可以看出,石窟洞口顶板位置变形较周围岩层较大,其位移主要是由于 $Z$ 向位移造成的,即石窟沉降是造成石窟变形的主要原因。由局部位移图可以看出石窟顶板总位移由1.2~1.5 mm不等,在J1裂缝到凹腔附近处达到最大,其中沉降量在靠近洞口最大,为1.5 mm,另外石窟南北侧壁在自重应力影响下,侧壁发生了向外侧(南北向)扩展趋势,但位移量较小,为0.16 mm, $X$ 向位移为-0.55 mm。在自重应力影响下, $X$ 向、 $Y$ 向位移对石窟整体稳定性影响不大,造成石窟顶板位移主要原因是因为顶板沉降造成的,且由于钢板支撑以及裂缝存在的原因,其沉降相对不均匀。

图25为降雨工况下石窟位移云图,由图可以看出石窟周围附近总位移为3.5 mm, $X$ 向位移为-3.7 mm, $Y$ 向位移为-0.3 mm, $Z$ 向位移为1.2 mm,其中石窟洞口处最大位移为4.6 mm, $X$ 向最大位移为-4.0 mm, $Y$ 向最大位移为-0.35 mm, $Z$ 向最大位移为2.4 mm,可以看出石窟洞口顶板位置变形较周围岩层较大,其位移主要朝着洞口处及顶板下方进行发展。

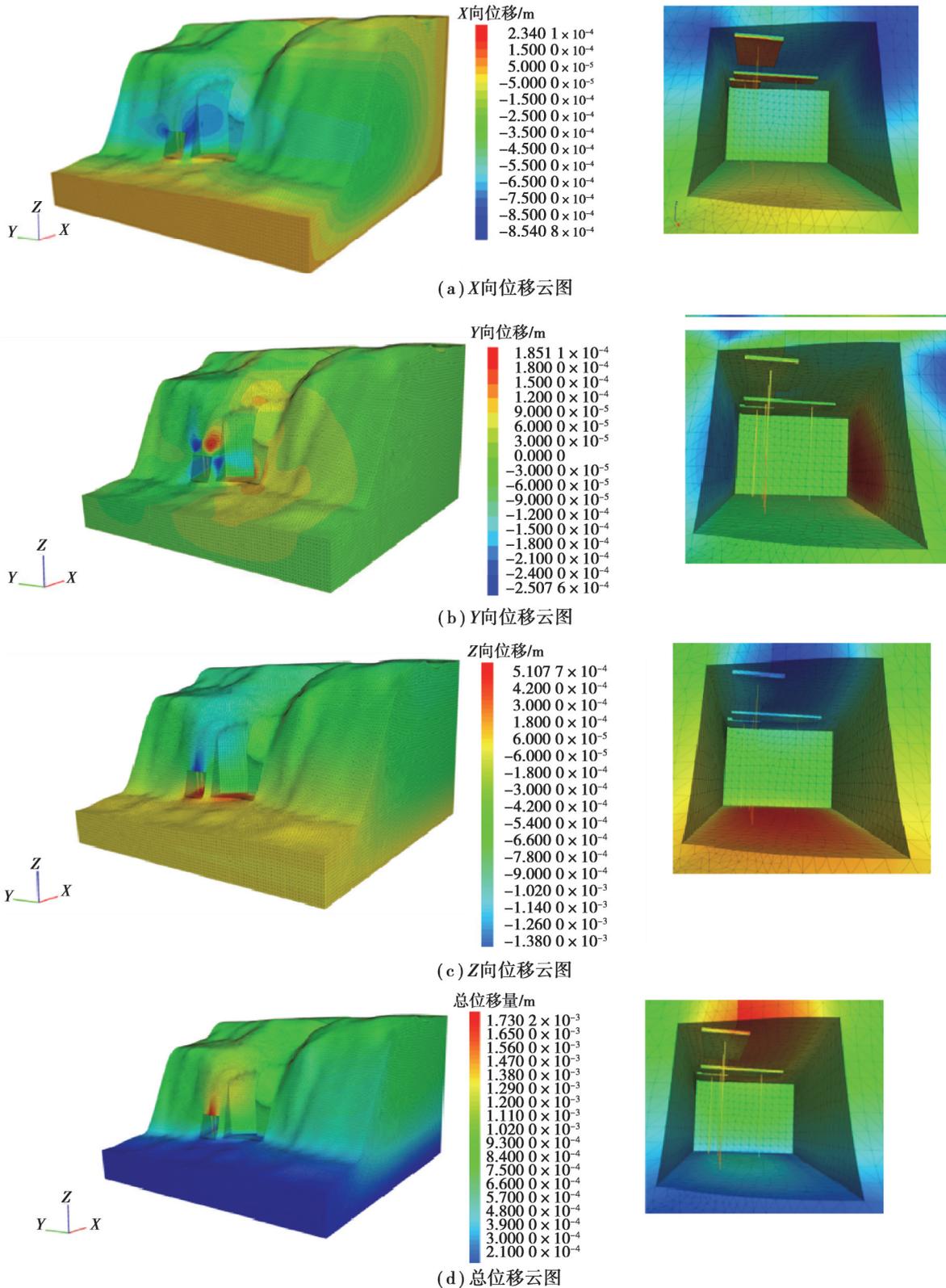


图 24 天然工况下石窟位移云图

Fig. 24 Cloud map of cave displacement under natural working conditions

由局部位移图可以看出,石窟顶板总位移由 4.11~4.62 mm 不等,在 J1 裂缝到凹腔附近处达到最大,其中沉降量在靠近洞口最大,为 4.65 mm,石窟顶板在东西向位移由 3.08~4.02 mm,距离洞口越近其位移量越大,在洞口处水平位移达到最大,另外石窟南北侧壁在自重应力影响下,侧壁发生了向外侧(南北向)扩展趋势,但位移量较小,为 0.16 mm,对石窟整体稳定性影响不大。在降雨过后孔隙水压力影响下,造成石窟顶板位

移主要原因是因为顶板沉降及洞口处水平位移造成的。

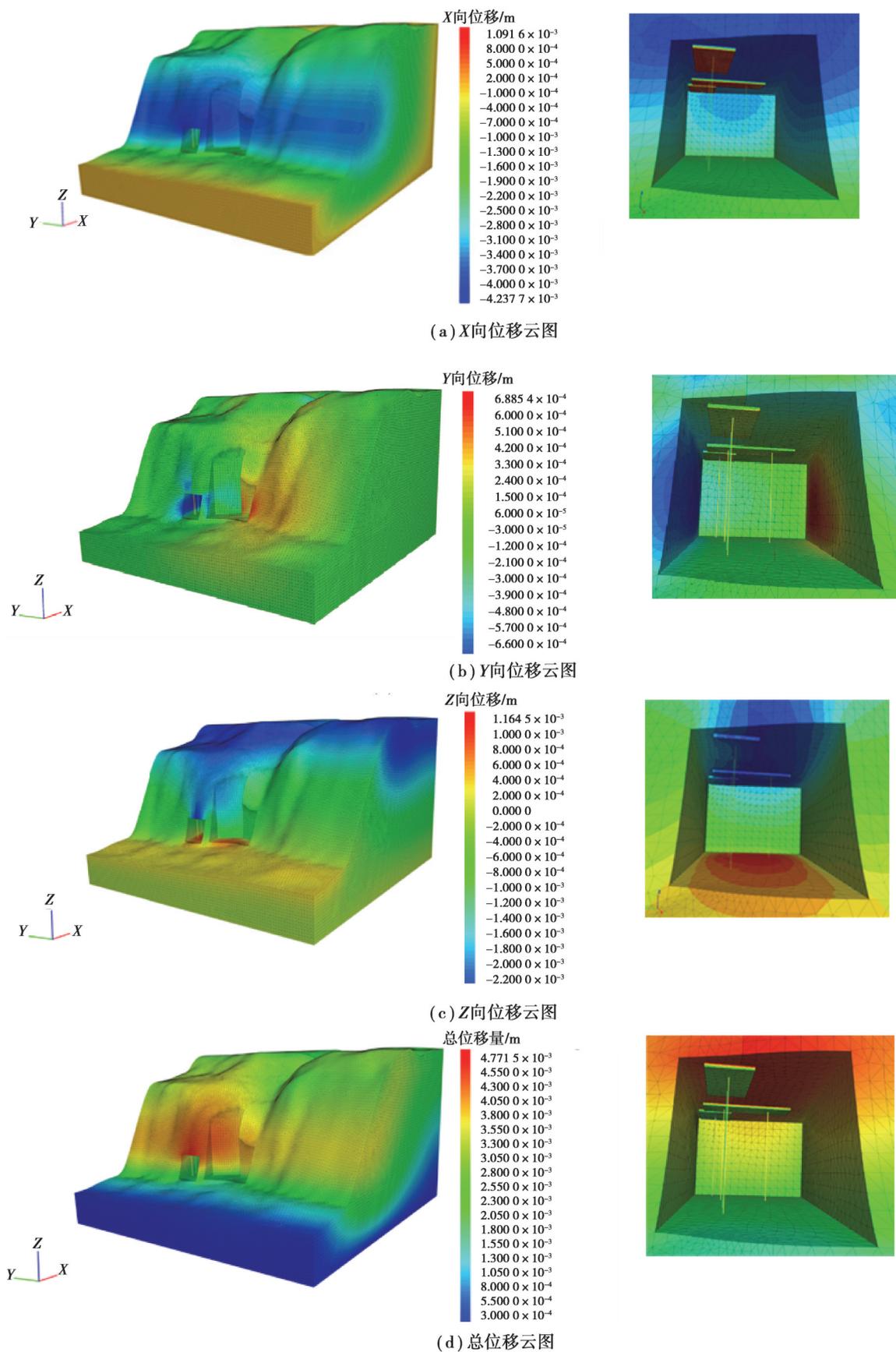


图25 降雨工况下石窟位移云图

Fig. 25 Grotto displacement cloud map under rainfall conditions

### 3.3 裂缝接触面分析

由图 26(a)可以看出,J1 裂缝在靠近洞口处以及 J2 裂缝发生了较为明显的法向位移,但位移数值较小,对石窟稳定性影响不大。图 26(b)为裂缝切向位移云图,除了 J5 裂缝其他裂缝均产生一定量切向位移,其平均值为 1.35 mm,J1 裂缝在靠近洞口处产生 2.4 mm 位移。由此可以看出洞口处的裂缝在自然工况下产生切向移动的现象,其中洞口处最容易失稳。

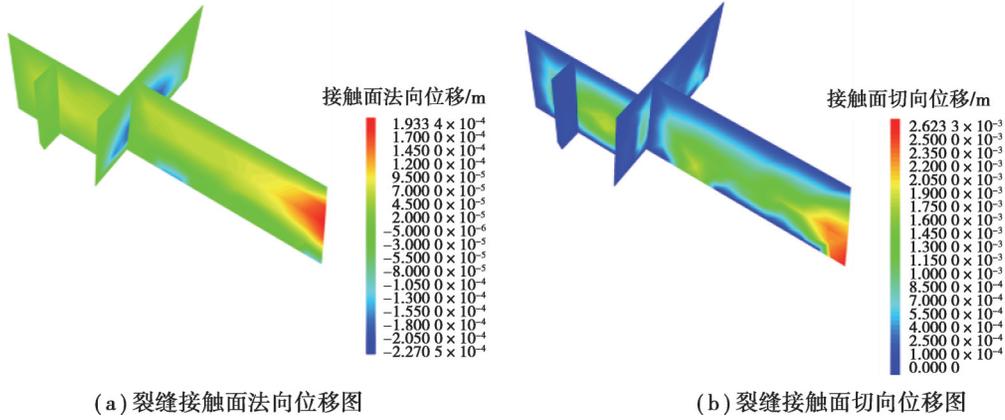


图 26 自然工况下裂缝接触面位移图

Fig. 26 Displacement of crack contact surface under natural conditions

由图 27 裂缝应力分布图可以看出,无论是法向应力还是切向应力主要分布在 J1、J3、J5 裂缝处,其法向应力平均值为 6 kPa,切向应力平均值为 1.5 kPa,而在洞口位置产生了应力集中现象,其法向应力增加至 17 kPa,切向应力增加至 3 kPa,可以看出洞口处是最容易发生破坏的位置。

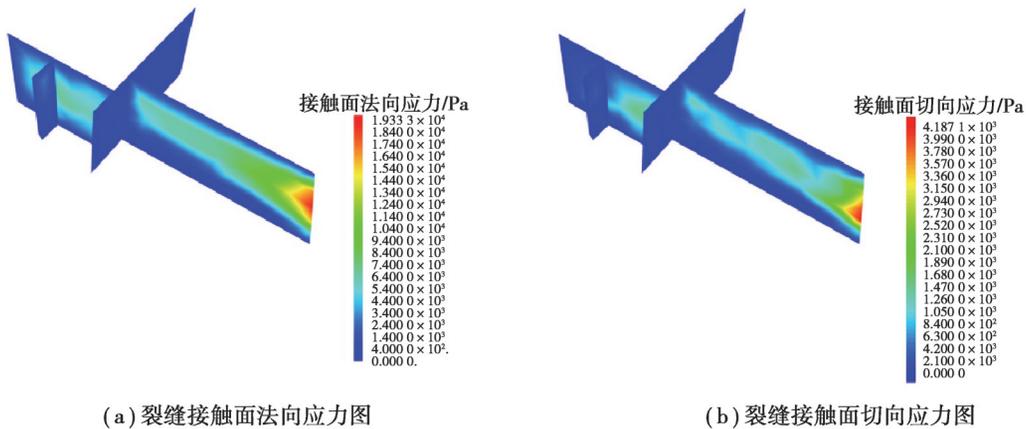


图 27 自然工况下裂缝接触面应力图

Fig. 27 Stress of crack contact surface under natural conditions

由图 28 可以看出,相较于自然工况,降雨工况下,J1、J2、J3、J4 裂缝法向位移和切向位移均有了明显增加的趋势,其中 J1 裂缝中部位置以及 J3、J4 裂缝法向位移增加较为明显,法向位移平均增加 0.19 mm,而 J1 洞口处裂缝、J3 裂缝切向位移有了明显的增加,平均增加 1.4 mm。其原因为孔隙水压力的增加导致顶板岩石有效应力降低,加大了裂缝产生了切向移动的趋势,最大切向位移达到 4.1 mm,在降雨影响下裂缝的开合可能会导致石窟顶板的失稳破坏。

图 29 为降雨条件下裂缝接触面应力图,法向应力和切向应力均集中在 J3 裂缝处,相较于自然工况下应力集中于洞口位置,应力出现了向内部移动的趋势,说明在降雨条件下 J3 裂缝附近可能会首先发生失稳。

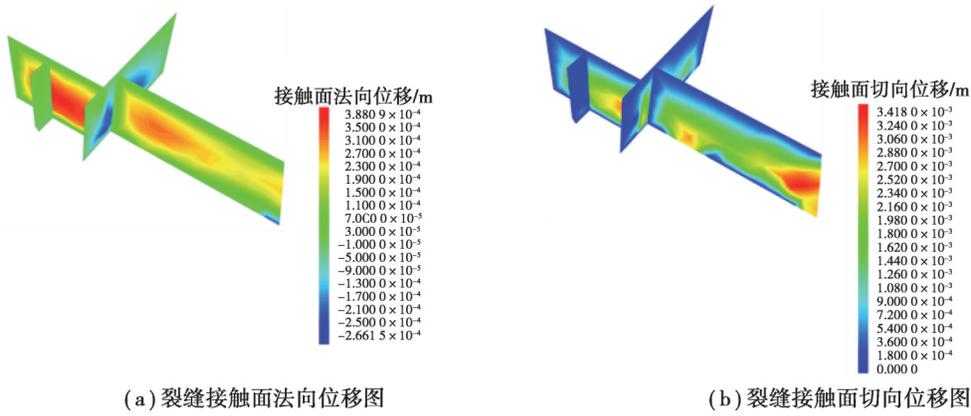


图 28 降雨工况下裂缝接触面位移图

Fig. 28 Displacement of crack contact surface under rainfall condition

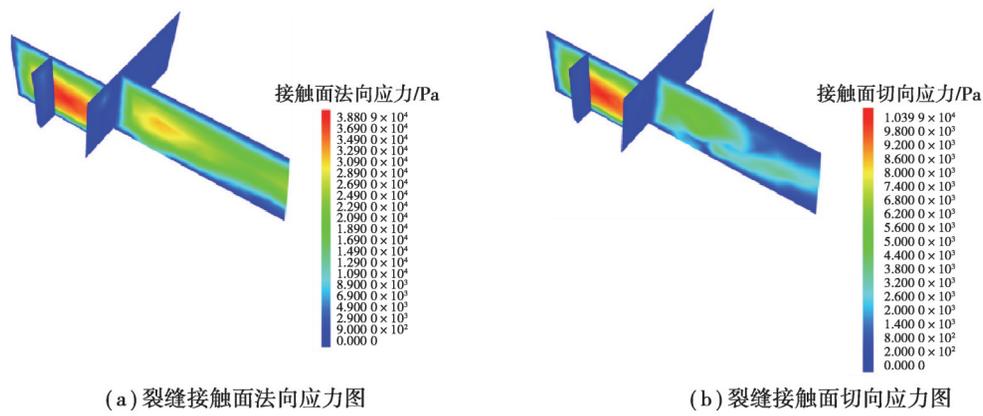


图 29 降雨条件下裂缝接触面应力图

Fig. 29 Stress of crack contact surface under rainfall conditions

### 3.4 钢板支护变形机理分析

168 窟顶板位移在自然工况下主要集中在顶板沉降,而在降雨工况下主要发生的是顶板沉降及南北向水平位移;自然工况下 J1 裂缝洞口、J2 裂缝洞口处位移最大,应力集中于洞口裂缝处;降雨工况下 J1、J3 裂缝位移较为显著,应力集中于 J3 裂缝;石窟四周造成了一定程度的不均匀沉降。

根据分析结果确定在 J1 裂缝、J2 裂缝、J3 裂缝处进行裂缝监测,并对石窟顶板四周进行位移监测。

### 3.5 石窟顶板监测点布设

根据现场情况及数值模拟结果在窟顶 J1 裂缝中段及洞口处、J2 裂缝、J3 裂缝以及空腔墙壁上各布置 1 个裂缝计,用以监测裂缝的开合情况,规定裂缝开裂为正,闭合为负;在凹砌钢筋混凝土墙撑上安装 3 套三轴智能倾角传感器,监测墙体整体的三维倾斜;在窟顶均匀布设 3 条三维变形监测阵列测线(每条 7 m),对顶板三维空间内变形数据进行监测。监测点具体布置如图 30 所示。

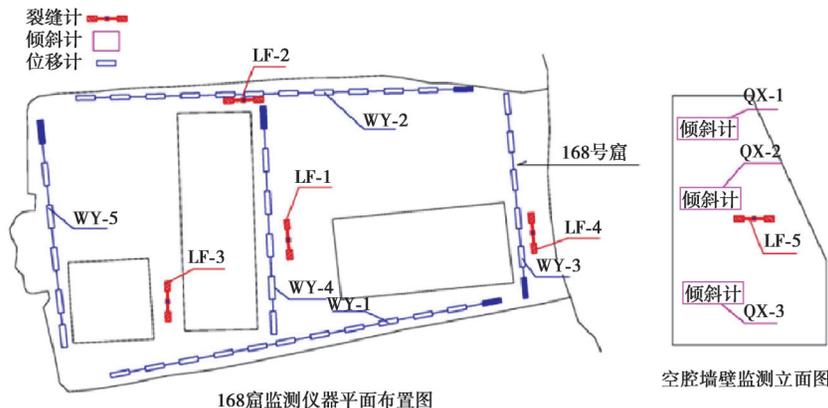


图 30 石窟顶板与凹腔监测点布置

Fig. 30 Layout of monitoring points of grotto roof and cavity

### 4 施工全过程监测数据分析

#### 4.1 注浆阶段裂缝计数据分析

由图 31~33 可知石窟中部 J1 裂缝、石窟洞口 J1 裂缝、J2 裂缝在裂隙注浆阶段其数据变化趋势保持一致,呈现闭合-稳定的过程,而 J3 裂缝与凹腔处裂缝在考虑仪器误差的情况下可以认为裂缝未发生改变。根据降雨量和裂缝数据综合分析,石窟在 5~8 月期间处于降雨量较大阶段,在降雨季节窟内湿度增加,裂缝周围砂岩具有吸水膨胀作用,岩石膨胀造成了裂缝的持续闭合现象。随着对石窟裂缝注浆工作的深入,在 8~9 月期间,裂缝没有出现进一步发展的趋势,9~10 月期间,随着降雨量的减少和注浆工作的完成,使得裂缝保持相对稳定。

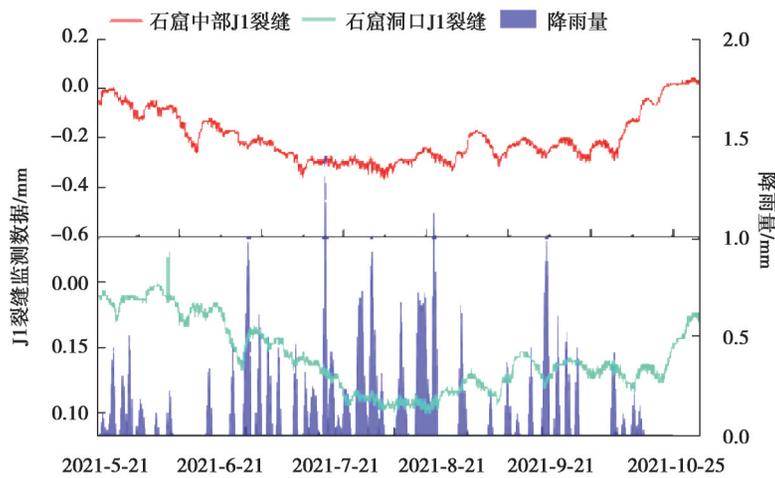


图 31 J1 裂缝监测数据

Fig. 31 J1 crack monitoring data

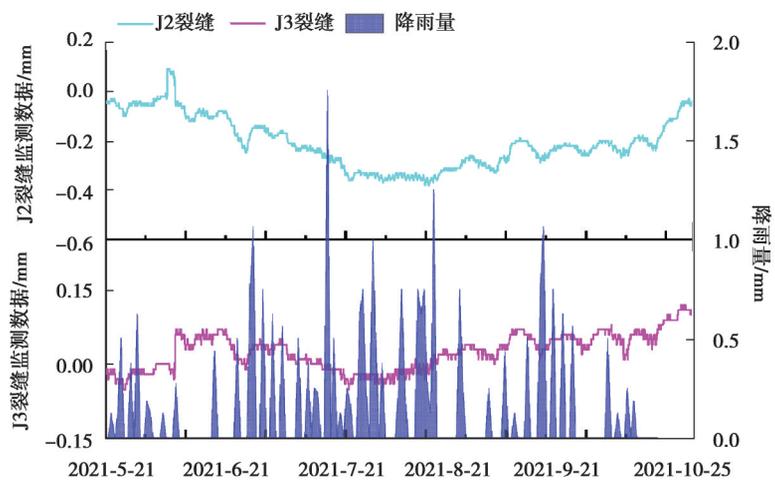


图 32 J2、J3 裂缝监测数据

Fig. 32 J2, J3 crack monitoring data

由图 34~35 可知,2021 年 7 月,石窟左侧最大位移为-0.8 mm,右侧最大位移-1.22 mm,洞口最大位移-1.1 mm,后侧最大位移-1.2 mm,中侧最大位移-1.2 mm。2021 年 10 月,石窟左侧最大位移为-1.1 mm,右侧最大位移-1.17 mm,洞口最大位移-0.54 mm,后侧最大位移-1.22 mm,中侧最大位移-0.67 mm。

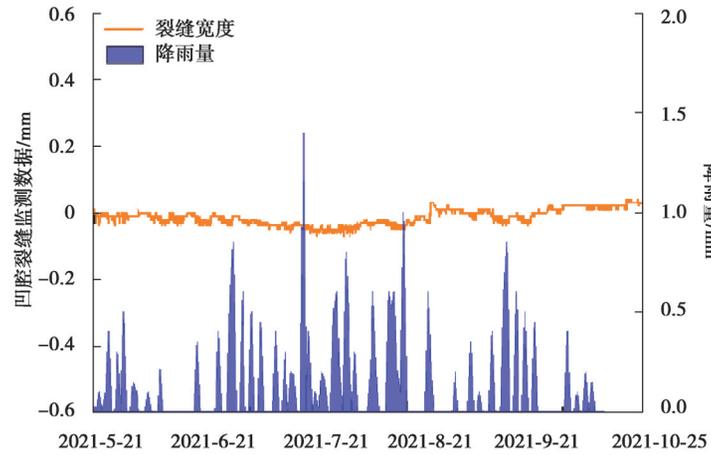


图 33 凹腔裂缝监测数据

Fig. 33 Cavity crack monitoring data

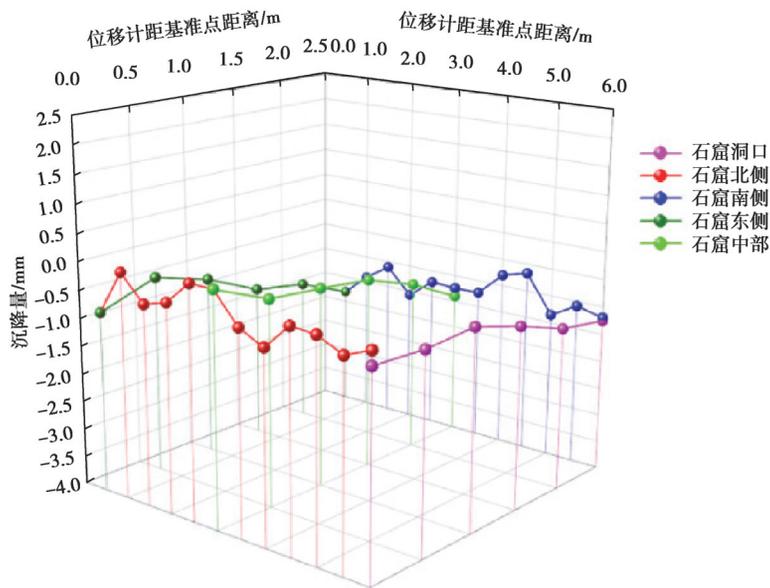


图 34 2021年7月监测数据

Fig. 34 Monitoring data in July 2021

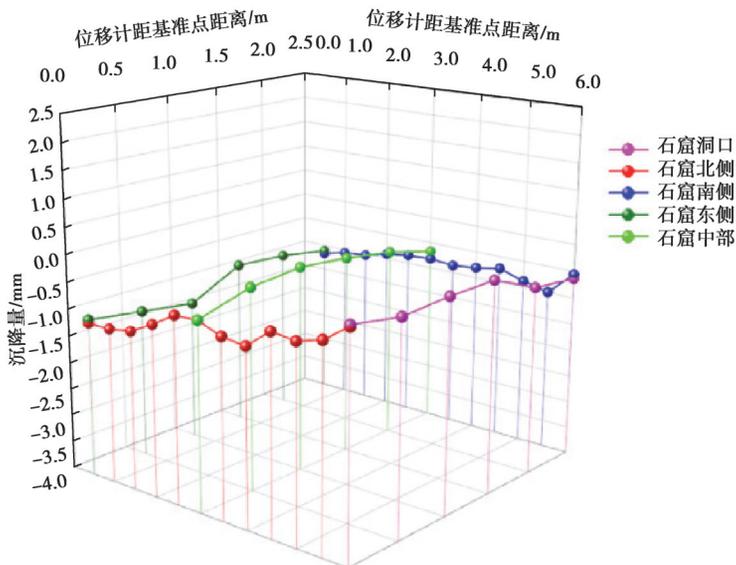


图 35 2021年10月监测数据

Fig. 35 Monitoring data in October 2021

由注浆阶段施工监测数据可以得出,石窟顶板位移数据在-1 mm 上下波动,原因是仪器设备受到石窟内环境温湿度的影响,其仪器数据会在误差范围内产生波动趋势,但从整体来看石窟顶板位移未发生改变。

### 4.2 凹腔加固阶段监测数据分析

2021.11.1~2022.3.2 主要进行了 168 窟周边凹腔加固处理工作,该工程主要分为 3 个阶段,裂缝监测曲线如图 36~39 所示。

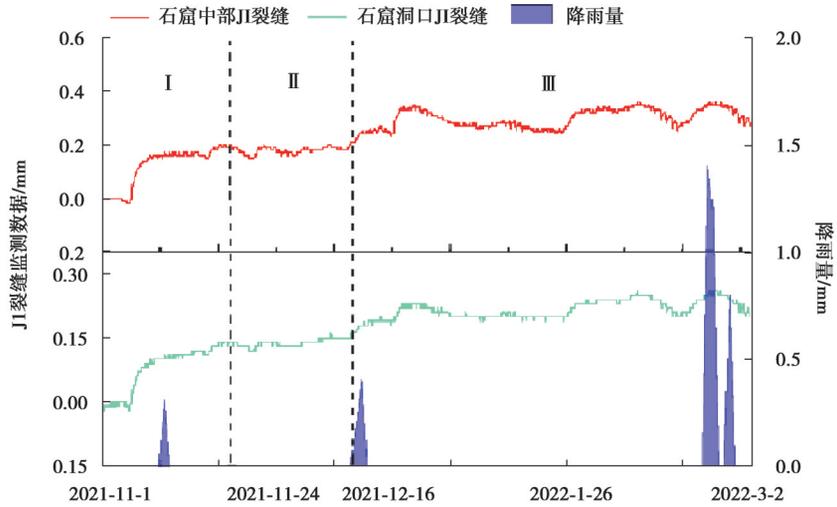


图 36 J1 裂缝监测数据

Fig. 36 J1 crack monitoring data

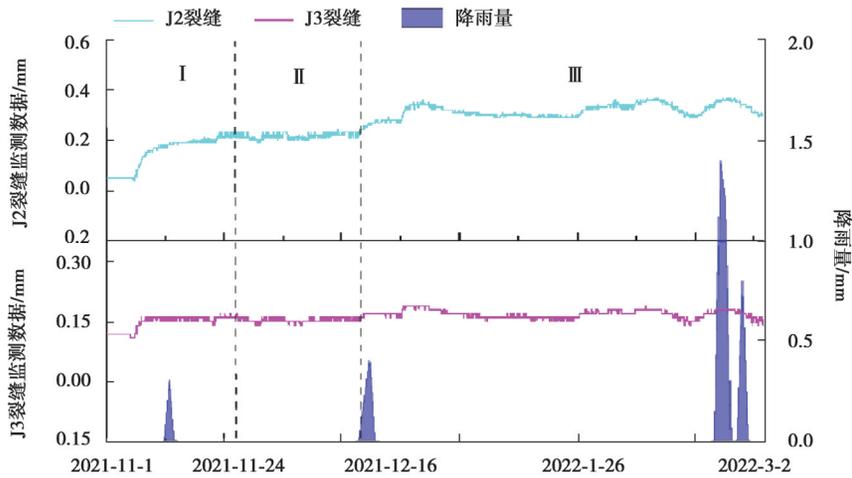


图 37 J2、J3 裂缝监测数据

Fig. 37 J2, J3 crack monitoring data

I阶段(2021.11.1~2021.11.24):对凹腔排水廊道施加撑砌、对廊道顶板混凝土进行浇筑;

II阶段(2021.12.5~2021.12.16):对凹腔北壁进行加固;

III阶段(2021.12.16~2022.3.2):对凹腔支撑墙基础进行浇筑。

通过对该阶段裂缝计与位移计判断石窟受扰动情况。

I阶段:石窟中部 J1 裂缝从 0 mm~0.17 mm,石窟洞口 J1 裂缝从 0~0.1 mm, J2 裂缝扩展至 0.2 mm, J3 裂缝保持在 0.15 mm,凹腔裂缝保持在 0 mm。

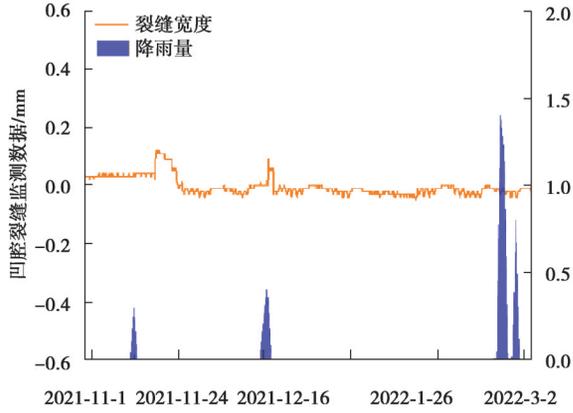


图 38 凹腔裂缝监测数据

Fig. 38 Concave crack monitoring data

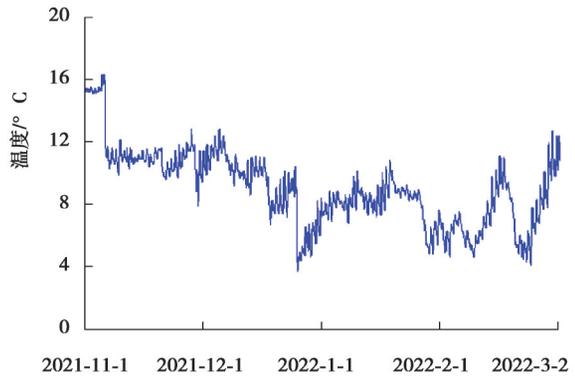


图 39 石窟内温度监测曲线

Fig. 39 Temperature monitoring curve in grottoes

II阶段:石窟中部J1裂缝从0.17~0.2 mm,石窟洞口J1裂缝从0.1~0.15 mm,J2裂缝保持在0.2 mm,J3裂缝保持在0.15 mm,凹腔裂缝保持在0 mm。

III阶段:石窟中部J1裂缝从0.2~0.35 mm,石窟洞口J1裂缝从0.15~0.24 mm,J2裂缝保持在0.3 mm,J3裂缝保持在0.15 mm,凹腔裂缝保持在0 mm。

通过上述裂缝变化规律结合石窟内温度进行分析,裂缝变化趋势与温度变化趋势呈现负相关趋势。I阶段初始阶段石窟内温度由16°C下降至10°C,该阶段对应J1裂缝、J2裂缝快速扩展阶段,裂缝变化与温度变化相一致,II、III阶段随着温度间断下降裂缝保持间断持续扩展现象,由此可知在凹腔加固阶段,其裂缝扩展主要与石窟内温度变化相关。

由图40~41位移计监测数据可知,2021年11月与2022年2月石窟洞口、石窟中部、石窟东侧位移计数据稳定在-0.75 mm附近,石窟北侧和石窟南侧位移计数据在-0.5~-1mm之间波动,其波动趋势处在一个较小范围内,石窟顶板处于一个稳定状态。

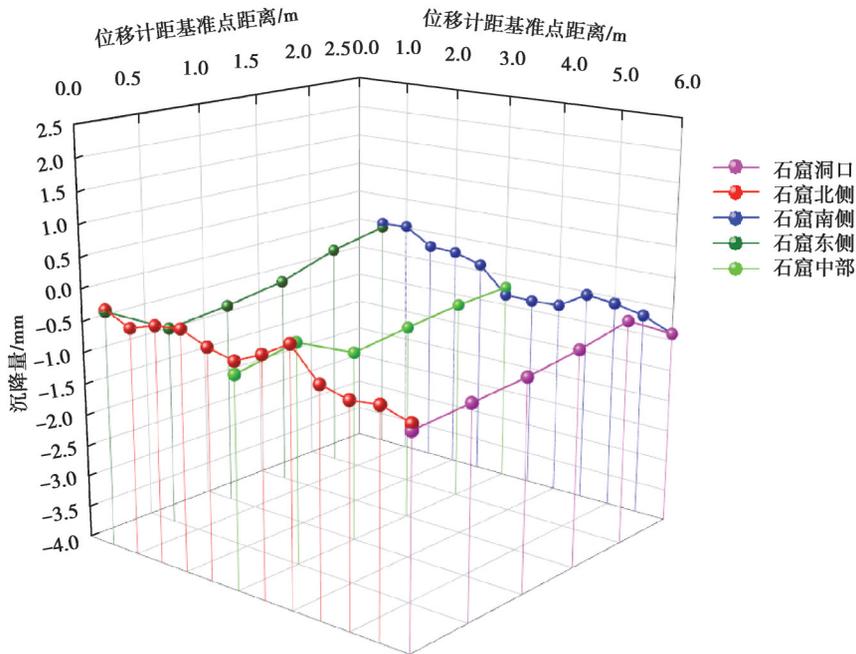


图 40 2021年11月监测数据

Fig. 40 Monitoring data in November 2021

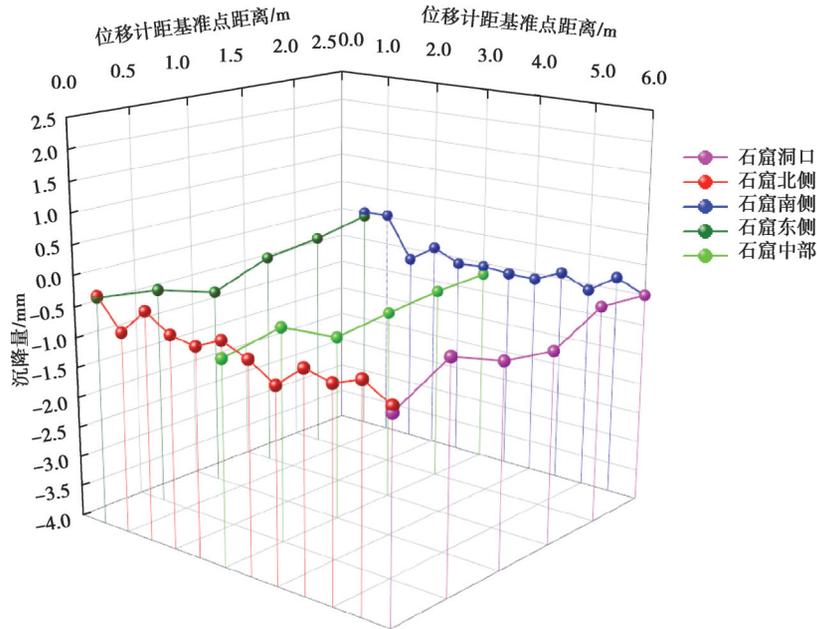


图 41 石窟 2022 年 2 月监测数据

Fig. 41 Monitoring data in February 2022

### 4.3 悬吊梁施工

2022.3.2~2022.8.30 主要进行了 168 窟顶板悬吊梁加固工作,该工程主要分为 4 个阶段,图 42~44 为裂缝计监测数据。

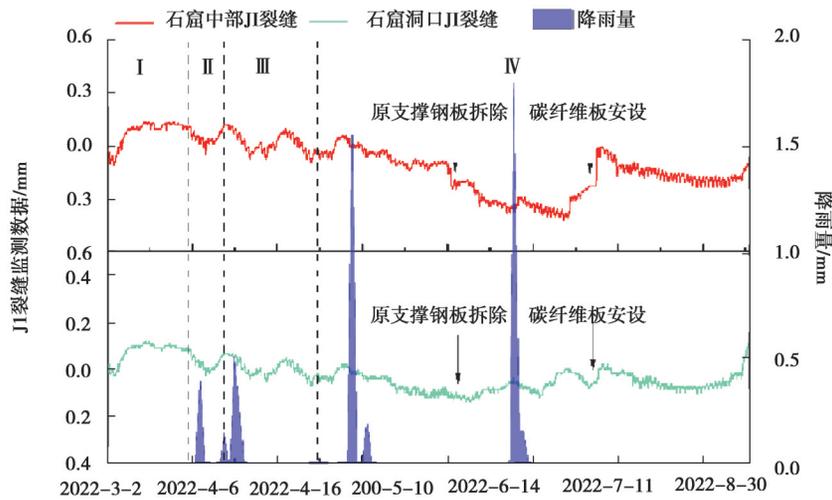


图 42 J1 裂缝监测数据

Fig. 42 J1 crack monitoring data

I 阶段(2022.3.2~2022.4.6):钻机平台搭设,钻孔施工;

II 阶段(2022.4.6~2022.4.16):岩顶悬吊梁支墩石方基础开挖、悬吊梁锚杆钻孔、窟顶板开槽;

III 阶段(2022.4.16~2022.5.10):悬吊梁浇筑模板安装、加固;

IV 阶段(2022.5.10~2022.8.30):主要在 6 月 4 日和 7 月 11 日分别对石窟顶板支撑钢板拆除、碳纤维板进行安设;

通过对该阶段裂缝计、位移计以及倾斜计判断石窟受扰动情况。

I 阶段:J1 中部裂缝保持在 -0.02~0.11 mm 之间;J1 洞口处裂缝处于 0~0.08 mm 之间;J2 裂缝处于 0.26~

0.33 mm 之间;J3 裂缝处于 0.06~0.11 mm 之间;

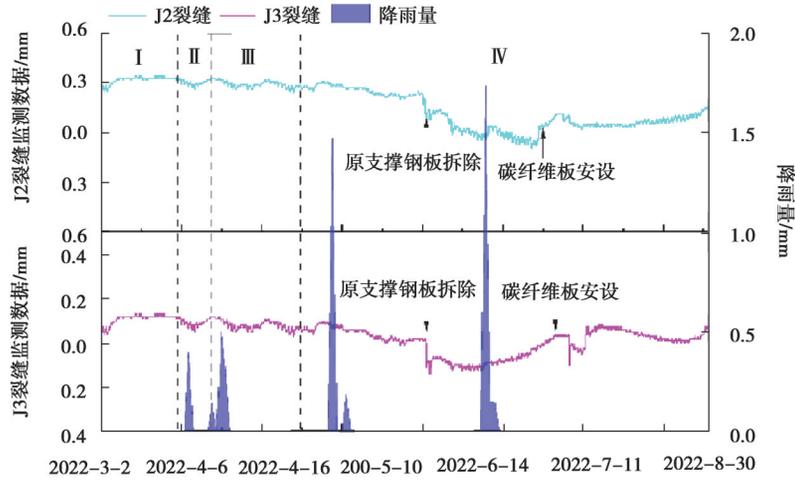


图 43 J2、J3 裂缝监测数据

Fig. 43 J2, J3 crack monitoring data

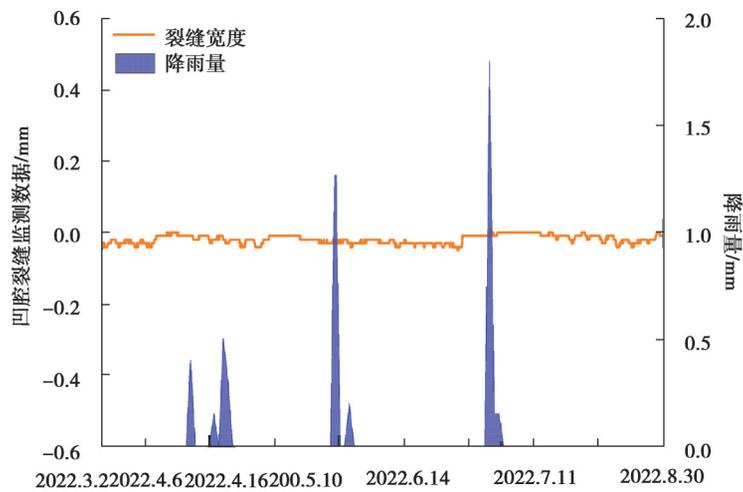


图 44 凹腔裂缝监测数据

Fig. 44 Cavity crack monitoring data

II 阶段: J1 中部裂缝保持在 0.11~0.12 mm; J1 洞口处裂缝处于 0.08~0.05 mm 之间; J2 裂缝处于 0.33~0.32 mm 之间; J3 裂缝处于 0.11~0.12 mm 之间;

III 阶段: J1 中部裂缝保持在 0.12~-0.03 mm; J1 洞口处裂缝处于 0.06~-0.03 mm 之间; J2 裂缝处于 0.33~0.27 mm 之间; J3 裂缝处于 0.12~0.07 mm 之间;

IV 阶段: J1 中部裂缝保持在 -0.03~-0.11 mm; J1 洞口处裂缝处于 -0.04~0.04 mm 之间; J2 裂缝处于 0.27~0.14 mm 之间; J3 裂缝处于 0.07~-0.1 mm 之间;

J1 中部裂缝: 在原支撑钢板拆除后裂缝产生了 -0.15 mm 左右的闭合趋势, 在碳纤维板装后又恢复正常, 可以认为在钢板拆除过程中对石窟顶板产生了轻微扰动现象, 并且碳纤维板对限制裂缝数据产生波动起到了很好的限制作用。

J1 洞口处裂缝: 3 月 2 日~8 月 30 日之间, 整体数据保持在 0.05 mm 附近, 在整个悬吊梁施工过程中, 洞口处的裂缝未发生改变, 即一直保持平稳的态势。

J2 裂缝:3 月 2 日~6 月 24 日期间,数据保持在 0.3 mm,原支撑钢板拆除后数据保持在 0~0.15 mm 之间,碳纤维板安装后数据稳定在 0.15 mm。

J3 裂缝:3 月 2 日~到 8 月 30 日期间,除了原支撑钢板拆除后数据有 0.1 mm 的闭合外,其整体曲线保持在 0~0.1 mm 之间。

由上述裂缝数据分析可知,在悬吊梁整体施工阶段,除了钢板拆除对顶板该部位裂缝造成轻微闭合外,其余顶板裂缝整体处于稳定态势。

由图 45~46 位移计数据可以看出石窟洞口、石窟中部、石窟东侧位移计数据稳定在 -0.25 mm 附近,石窟北侧和石窟南侧位移计数据在 -0.5~-1mm 之间波动,其波动趋势处在 1 个较小范围内,石窟顶板处于 1 个稳定状态。

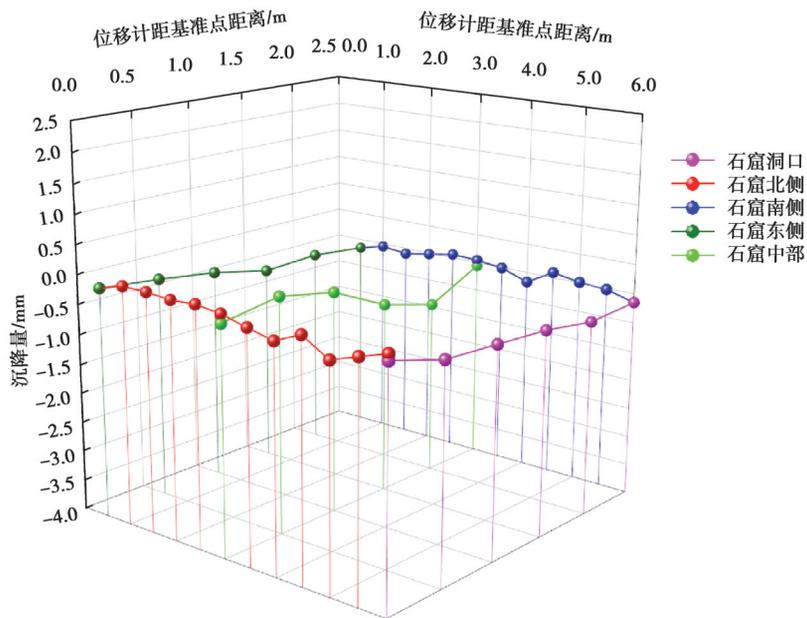


图 45 2022 年 4 月监测数据

Fig. 45 Monitoring data in April 2022

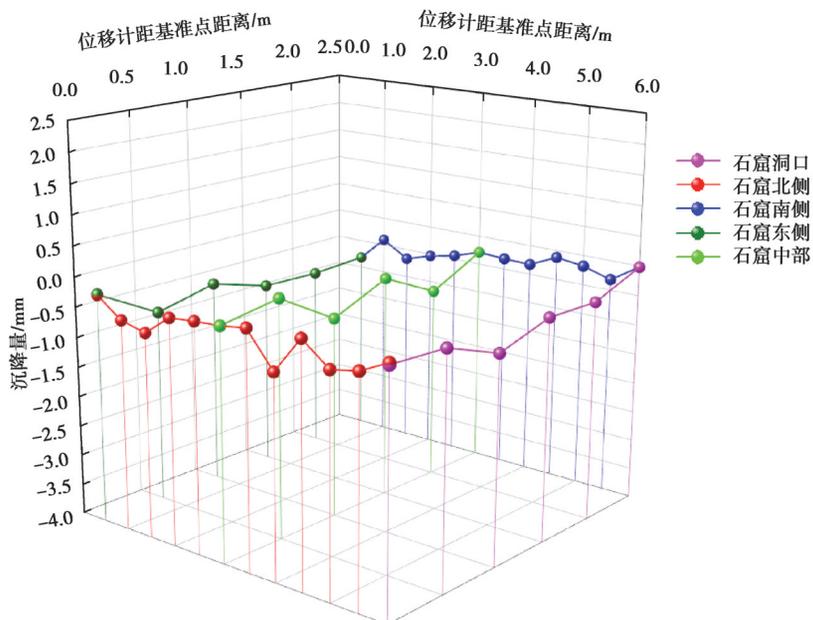


图 46 2022 年 8 月监测数据

Fig. 46 Monitoring data in August 2022

#### 4.4 工程治理效果分析评价

1)注浆加固阶段:石窟中部J1裂缝、石窟洞口J1裂缝、J2裂缝在裂隙注浆阶段其数据变化趋势保持一致,呈现闭合-稳定的过程,而J3裂缝和凹腔岩壁处裂缝在考虑仪器误差的情况下可以认为裂缝未发生改变。裂缝周围岩石吸水膨胀造成了裂缝的持续闭合现象。随着注浆工作的完成,使得裂缝保持相对稳定。由温度曲线可以看出,温度变化与裂缝变化大致呈现负相关趋势,温度升高时裂缝呈现闭合趋势,即裂缝周围岩石具有“热胀冷缩”效应;石窟顶板位移数据在-1 mm上下波动,从整体来看石窟顶板位移未发生改变。

2)凹腔加固阶段:初始阶段石窟内温度由16°C下降至10°C,该阶段对应J1裂缝、J2裂缝快速扩展阶段,裂缝变化与温度变化相一致,并随着温度间断下降裂缝保持间断持续扩展现象,由此可知在凹腔加固阶段,其裂缝扩展主要与石窟内温度变化相关;石窟洞口、石窟中部、石窟东侧位移计数据稳定在-0.75mm附近,石窟北侧和石窟南侧位移计数据在-0.5~-1 mm之间波动,其波动趋势处在一个较小范围内,石窟顶板处于一个稳定状态。

3)悬吊梁施工阶段:在悬吊梁整体施工阶段,除了钢板拆除对顶板该部位裂缝造成轻微闭合外,其余顶板裂缝整体处于稳定态势,并且碳纤维板对限制裂缝数据产生波动起到了很好的限制作用;石窟洞口、石窟中部、石窟东侧位移计数据稳定在-0.25 mm附近,石窟北侧和石窟南侧位移计数据在-0.5~-1 mm之间波动,其波动趋势处在一个较小范围内,石窟顶板处于稳定状态。

## 5 结 论

1)针对168窟产生的严重结构稳定性及洞窟内顶部裂隙纵横交错的问题,为了对洞窟进行长期保护以及创造有利的环境条件。主要采用窟内裂隙、空鼓注浆、石窟南侧壁凹腔加固、悬吊锚杆施工等科学合理的工程措施对168窟进行加固,并对整个施工过程进行跟踪监测。

2)考虑到石窟内裂缝较多,顶板情况比较复杂,施工工序繁多、施工过程中对石窟可能造成扰动较多,利用数值模拟手段对监测点位进行选取。根据结果得出168窟顶板位移在自然工况下主要发生顶板沉降,而在降雨工况下主要发生的是顶板沉降及南北向水平位移;自然工况下J1裂缝洞口、J2裂缝处位移最大,应力集中于洞口裂缝处;降雨工况下J1、J3裂缝位移较为显著,应力集中于J3裂缝;石窟四周造成了一定程度的不均匀沉降。根据分析结果建议在J1裂缝、J2裂缝、J3裂缝处进行裂缝监测,并对石窟顶板四周进行位移监测。

3)通过对施工全过程监测数据进行分析可以得出施工对168窟造成的扰动较小,石窟内环境的温湿度变化是导致裂缝出现波动趋势的主要原因,但裂缝的变化并未影响到石窟顶板的位移,石窟顶板位移的数值保持稳定的趋势,可以认为温湿度仅影响了顶板岩石本身的性质,未对顶板的稳定性造成影响。

## 参考文献

- [1] Bharti G. Ajanta caves: deterioration and conservation problems (a case study)[J]. *Therigenology*, 2014, 4(s2-3): 77-87.
- [2] Guo Q L, Wang X D, Zhang H Y, et al. Damage and conservation of the high cliff on the Northern area of Dunhuang Mogao Grottoes, China[J]. *Landslides*, 2009, 6(2): 89-100.
- [3] 董勇,董丽娟,席浩焱,等.云冈石窟风化检测研究进展[J].*文物保护与考古科学*,2024,36(03):160-172.  
Dong Y, Ding L J, Xi H Y, et al. Research progress of weathering detection of Yungang Grottoes [J]. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 2024,36(03):160-172. (in Chinese)
- [4] 傅燕,田世艳.龙游石窟3号洞第3-2号岩柱的监测与开裂机理分析[J].*工程地质学报*,2009,17(6):823-828.  
Fu Y, Tian S Y. Monitoring and cracking mechanism for rock pillar no.3-2 in cavern no.3 of Longyou Cavern Group[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2009, 17(6): 823-828.(in Chinese)
- [5] 姜云辉,王金华,黎利兵,等.石窟岩体稳定性监测系统应用与研究[J].*文物保护与考古科学*,2014,26(4):70-75.

Jiang Y H, Wang J H, Li L B, et al. Research on cave rock stability and application of a monitoring system[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2014, 26(4): 70-75.(in Chinese)

- [ 6 ] Zheng L L, Fu X Z, Chu F. Grey incidence analyze of environment monitoring data and research on the disease prevention measures of Longmen Grottoes[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 153: 062006.
- [ 7 ] Tao Z G, Luo S L, Wu D, et al. Stability evaluation of deformation (denudation) of Yuanjue rock cave roof based on multisource monitoring[J]. Shock and Vibration, 2020, 2020: 8825612.
- [ 8 ] 张博, 崔惠萍, 裴强强, 等. 不同开放环境下北石窟洞窟温湿度变化特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(S1): 2834-2840.
- Zhang B, Cui H P, Pei Q Q, et al. Variation characteristics of temperature and humidity in North Grottoes under different opening regulation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(S1): 2834-2840.(in Chinese)
- [ 9 ] 王龙珍. 广域网大数据传输技术在石窟寺预防性保护中的运用——以敦煌研究院为例[J]. 科技通报, 2021, 37(09): 52-55+89.
- Wang L Z. Application of wide area network big data transmission technology in preventive protection of shiku temple[J]. Bulletin of Science and Technology, 2021, 37(09): 52-55+89.
- [ 10 ] 唐韵玮, 刘艳祯, 段伟, 等. 遥感技术对不可移动文物的灾害监测[J]. 中国文化遗产, 2021(04): 24-30.
- Tang Y W, Liu Y Z, Duan W, et al. Remote sensing technology for disaster monitoring of immovable cultural relics[J]. China cultural heritage, 2021(04): 24-30.
- [ 11 ] 刘逸堃, 高东亮, 马朝龙, 等. 基于时间序列分析的龙门石窟奉先寺微环境的实时监测与评估[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2021, 51(05): 787-796.
- Liu Y K, Gao D L, Ma C L, et al. Monitoring and assessment of the microclimate of Fengxian temple in Longmen Grottoes based on time series analysis[J]. Journal of Northwest University(Natural Science Edition), 2021, 51(05): 787-796.

(编辑 侯 湘)